

SIMULACION DE REGISTROS SISMICOS A PARTIR DE ESPECTROS DE DISEÑO

M. Doblaré, E. Alarcón

Cátedra de Estructuras
E.T.S.I. Ing. Industriales
Universidad Politécnica de Madrid

Resumen.— La simulación de registros sísmicos, compatibles con espectros medios de diseño, se ha convertido en una necesidad en los últimos años, debido principalmente a su exigencia en la norma de regulación del cálculo de centrales nucleares. En este trabajo se presentan distintas posibilidades de realización de esta simulación, así como una comparación entre ellas, apareciendo como una alternativa efectiva a los métodos clásicos la utilización del contenido de fase de los seismos reales. Mediante ello se establece un procedimiento que elimina la arbitrariedad que supone el uso de una función envolvente para definir la característica no estacionaria del registro.

Los distintos métodos son descritos detalladamente, así como la influencia de los diferentes parámetros que intervienen en cada uno de ellos. Por último se presentan algunos ejemplos numéricos.

INTRODUCCION

La ingeniería sísmica ha tenido un desarrollo creciente en las últimas décadas como consecuencia de las exigencias de diseño en estructuras de alta responsabilidad, principalmente centrales nucleares.

El análisis de estas estructuras requiere la creación de un modelo analítico de cálculo ante sollicitación sísmica, así como la prescripción de la excitación lo más acorde posible con la realidad.

Estas acciones se definen para un lugar determinado en forma de espectro de respuesta o en forma de un registro de aceleración artificial generado por computador.

La dificultad en la consecución de registros de las características adecuadas, para el diseño de elementos resistentes, ubicados en un lugar prefijado, ha sido la causa fundamental para el espectacular desarrollo alcanzado por el análisis espectral en los últimos tiempos. A ello también ha contribuido, en gran manera, la facilidad de utilización de esta metodología y la existencia de un amplio muestrario de espectros medio de diseño, independientes de las características del terreno (4), o dependientes en cierta medida de estas características (10), que representan la envolvente espectral de un archivo relativamente grande de registros.

Sin embargo, y pese a la profusa utilización de este tipo de análisis, el método de la respuesta espectral no es adecuado para todas las necesidades. Así, para el diseño de estructuras de gran responsabilidad, es necesario el estudio de la respuesta a lo largo de todo el intervalo de actuación de la carga, siendo insuficiente la estimación del máximo absoluto o probable de esa respuesta, asimismo la determinación del "espectro de piso" necesario para el cálculo de instrumentación, piping, etc, solo puede lograrse a través de una historia temporal.

Para realizar dicho estudio, se hace necesaria la utilización de registros con unas características determinadas, lo más aproximadas posible a los valores medios de diseño, recogidos en gran parte por las gráficas espectrales.

Un gran número de autores (1,3,7,8,11) han desarrollado técnicas de simulación artificial de registros sísmicos en las que en cierta medida se trata de recoger las características de amplitud, magnitud, fase etc. que definen un terremoto. Estas técnicas, sin embargo, se contraponen con las normas que rigen en la mayoría de los países para la definición de la excitación sísmica y que vienen prescritas en función de espectros medios de diseño.

En definitiva, el problema, y por tanto la solu-

ción de las dificultades anteriores, estriba en la simulación de registros a partir de curvas espectrales, que recojan la historia sismológica reciente y, en su caso, las características reológicas del lugar considerado.

Para realizar este apartado se han propuesto varias soluciones por distintos autores (2,5,9), que en general, emplean un mismo proceso con algunas variaciones en los parámetros que intervienen en el desarrollo del método.

En este trabajo se realiza una comparación entre varios de ellos, así como propone una técnica alternativa, siguiendo a Ohsaki (5) basada en la generación de seismos a partir del estudio de su contenido de fase.

PROCESO DE SIMULACION

Como ya se indicó en el apartado anterior, muchos autores han propuesto métodos de simulación de registros. Prácticamente todos ellos, consideran el terremoto como el producto de un proceso aleatorio estacionario, obtenido a partir del filtrado de un ruido blanco, por una función envolvente - que otorga el carácter no estacionario al registro.

Esta función de modulación tiene la forma de la - Fig. 1 y produce los tres periodos fundamentales en todo registro sísmico: un tiempo de subida, que aquí se considera parabólico; un tiempo de mantenimiento de la aceleración; y un tiempo de decrecimiento exponencial. La duración de cada uno de estos periodos, así como el valor de la constante de decrecimiento exponencial son variables que dependen del tipo de terremoto considerado, principalmente de su duración y magnitud.

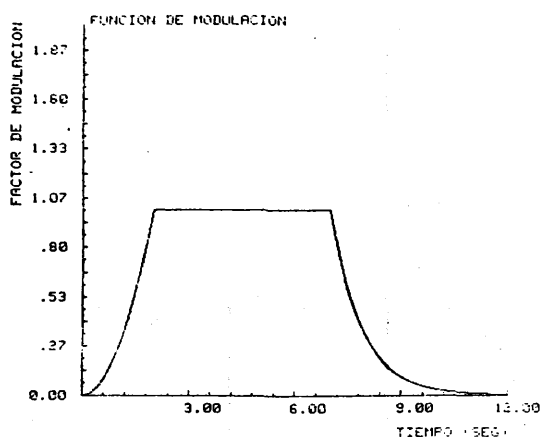


Fig. 1 .Función de modulación

Un proceso totalmente análogo se sigue para la simulación de registros compatibles con un espectro dado. Es decir, se considera como el producto de una función envolvente por un proceso estacionario aleatorio, que depende de las características del espectro.

En definitiva la expresión que se utiliza es

$$\ddot{z}(t) = \zeta(t) \cdot R \int_{-\infty}^{\infty} [A(\omega) e^{i(\omega t + \phi(\omega))}] d\omega \quad (1)$$

donde $\zeta(t)$ es la función de modulación, y el resto del producto es la parte real de la transformada inversa de Fourier de una función $A(\omega)$ e $\phi(\omega)$ es decir de un vector de módulo $A(\omega)$ y fase $\phi(\omega)$.

La función $A(\omega)$ viene prescrita, en función de la transformada de Fourier de la parte principal del registro, definida anteriormente, como

$$A(\omega) = \frac{2}{T} \left| \int_0^T \ddot{z}_p(t) e^{i\omega t} dt \right| \quad (2)$$

Los valores de $\phi(\omega)$ se escogen como los puntos de una función aleatoria con una distribución de probabilidad uniforme.

Con base a ello se realiza un proceso iterativo en la forma siguiente:

- 1.- Generación, según la ecuación (1) de un registro no estacionario.
- 2.- Cálculo del espectro S_1 para el amortiguamiento deseado correspondiente al registro anteriormente calculado.
- 3.- Se comparan los valores en cada frecuencia de S_1 con los del espectro S_d propuesto. En caso de que se encuentren todos ellos dentro de la precisión requerida finaliza el proceso. En caso contrario se realiza el punto (4).
- 4.- Se modifica la función $A(\omega)$ en la forma

$$A^{i+1}(\omega) = \frac{S_d}{S_i} A^i(\omega) \quad (3)$$

donde i se refiere al ciclo actual de iteración.

A continuación vuelve a comenzar en el punto (1):

El problema inicial, pues, se reduce exclusivamente a la elección de los parámetros para el comienzo de la iteración, es decir $A^0(\omega)$, o lo que es igual la consecución de la transformada de Fourier de la parte principal de un registro inicial de aproximación. Para ello, y siguiendo a Scanlan y Sachs (9), consideraremos que una cota inferior de ese valor de transformada de Fourier es el espectro de amortiguamiento cero. La definición de $A(\omega)$ corresponderá pues a este espectro de amortiguamiento $\xi = 0$.

El procedimiento alternativo, que si no radicalmente distinto, si disfruta de algunas características de diferenciación respecto al anterior, tiene en cuenta las características de los ángulos de desfase correspondiente a un registro - real.

Efectivamente, modificando convenientemente las características de fase del registro real puede eliminarse la utilización de la función de modula

ción, que por otra parte es un recurso bastante arbitrario para la definición de la no estacionariedad del seísmo.

Para realizar este proceso y poder tener un criterio adecuado de comparación hace falta el estudio de las características de fase de los registros reales, así como observar la modificación que en estas características introduce la modulación.

En definitiva, el método se diferencia del anterior exclusivamente en la definición de los ángulos de fase y en la ausencia de función envolvente, estando el efecto de esta sustituido por el de aquellas.

CARACTERISTICAS DE FASE DE LOS REGISTROS SISMICOS

Un registro sísmico puede definirse como la antitransformada de Fourier de una función compleja en la forma

$$\ddot{z}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{Z}(\omega) e^{-i(\omega t + \psi(\omega))} d\omega \quad (4)$$

Se denomina onda de fase de este registro a la historia en el tiempo que resulta de considerar $\ddot{Z}(\omega) = 1$.

En las Fig.s 2 y 3 puede observarse un registro sísmico y su onda de fase, viéndose que ambas son muy similares, si bien magnificado el contenido en altas frecuencias en la onda de fase respecto al registro inicial.

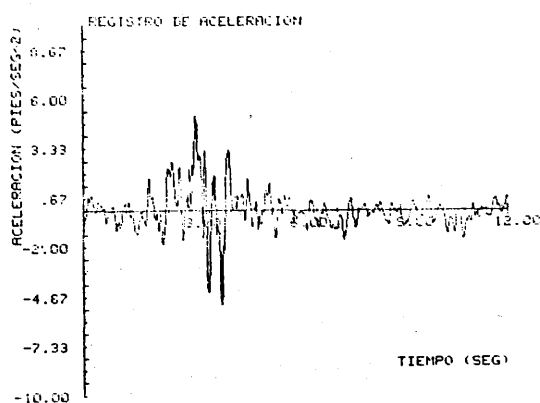


Fig. 2. Registro de aceleración

En lo que se refiere a las diferencias de fase se entiende como tal la diferencia existente entre los valores consecutivo de la variable $\psi(\omega)$ una vez discretizada, es decir

$$\Delta\psi_k = \psi_{k+1} - \psi_k \quad (5)$$

pero entendida esta diferencia siempre en sentido antihorario, lo que dará lugar a un valor entre 0 y 2π .

La distribución de ángulos de fase para una onda

estacionaria tal como la que se muestra en la Fig. 4 se presenta en la Fig.5 observándose que sigue prácticamente una distribución uniforme, por tanto las diferencias de fase, cuyo histograma se indica en la Fig. 6 sigue una distribución similar.

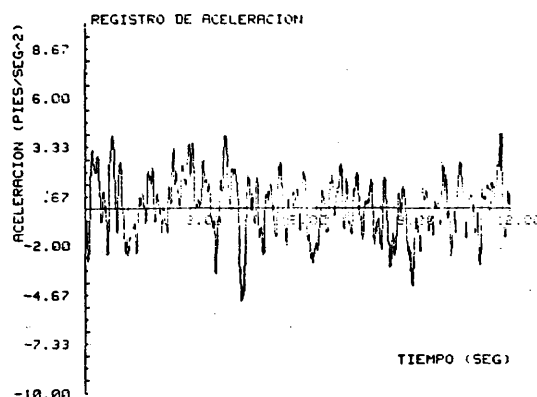


Fig. 4 Proceso estacionario

En cambio para registros reales tales como el de la Fig. 2 la distribución de ángulos de fase ya no es uniforme, y además la distribución de diferencias de fase sigue una distribución normal muy aproximadamente. Ambos efectos pueden observarse en las Fig. 7 y 8

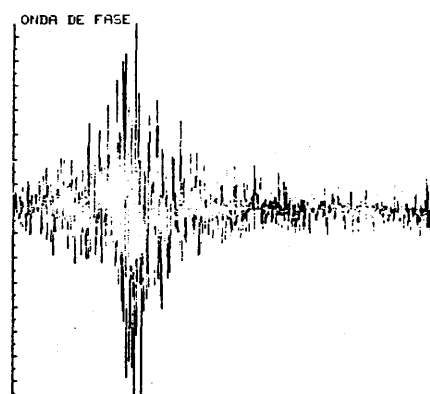


Fig. 3. Onda de fase

Se observa además la particularidad de que la función de modulación y la distribución de diferencias de fase en registros reales son muy parecidas. Tal hecho, hizo plantearse la posibilidad de su relación y Ohsaki (5), mediante un estudio concienzudo de registros reales, consiguió relacionar ambas, de forma que la media de la distribución de diferencias coincide prácticamente con la posición de la zona constante de la función envolvente, siendo la duración de esta zona del orden de la desviación típica de la

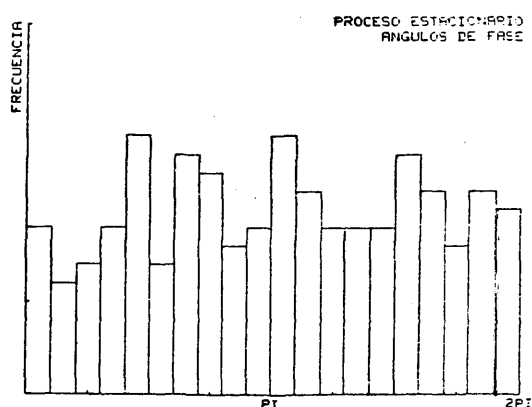


Fig. 5. Proceso estacionario

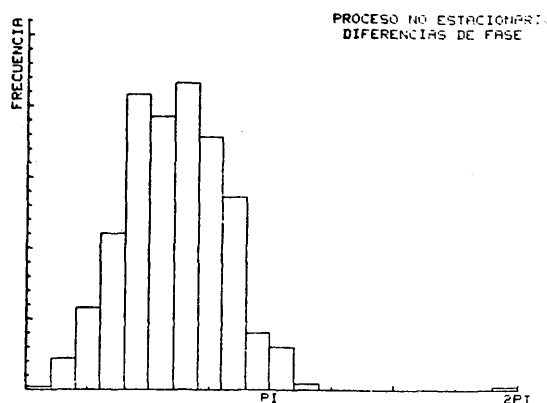


Fig. 8. Proceso no estacionario

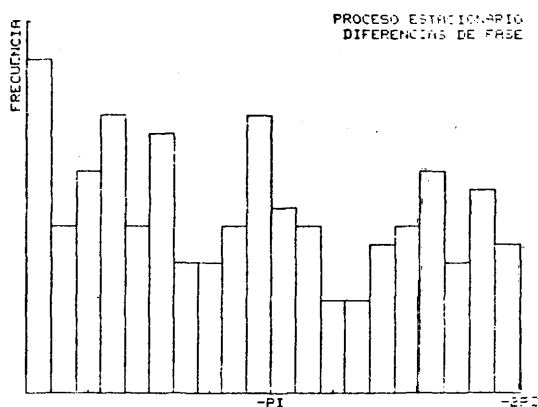


Fig. 6. Proceso estacionario

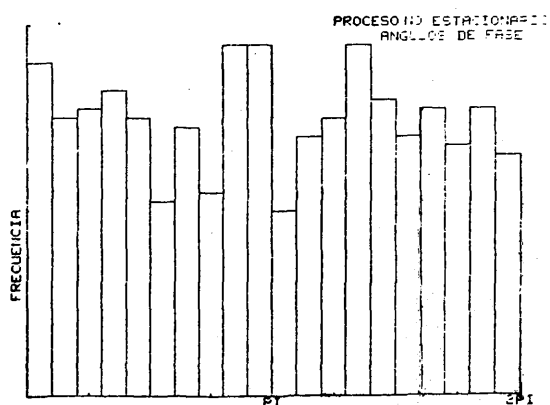


Fig. 7. Proceso no estacionario

distribución.

Este hecho puede aprovecharse para la introducción de un conjunto de ángulos de fase cuyas diferencias sigan una distribución normal de características similares a la función de modulación, con lo cual podría salvarse la estacionariedad del registro sin necesidad de modular el resultado de la antitransformada correspondiente.

PARAMETROS DE DEFINICIÓN DEL ACELEROGRAMA

De acuerdo con todo lo indicado anteriormente será necesaria una definición previa de todos los parámetros que intervienen en la generación de un seismo compatible con un espectro dado. De acuerdo con la forma de elección de estos parámetros se tienen distintas posibilidades de realización del cálculo, y por ende distintos métodos de generación, con se discutirá a continuación.

1.--Espectros de diseño.-- Aunque todos los métodos propuestos pueden utilizarse, por supuesto, para cualquier tipo de espectro, en este trabajo y a modo de ejemplo se han utilizado como base, los espectros normalizados a 1g. que proponen Newmark, Blume y Kapur (4), aceptados por la NRC estadounidense (6) como espectros de diseño.

Los espectros correspondientes a $\xi=0\%$ y $\xi=2\%$ se encuentran en las Figs. 9 y 10. El primero nos servirá como se indicó para la definición inicial del $A(\omega)$, mientras que el segundo será el que se aproximará, ya que estos métodos no aproximan en la misma forma todos los espectros -- correspondientes a distintos amortiguamientos -- aunque sí en gran medida.

Existen otros procedimientos algo más sofisticados (2) que permiten la aproximación simultánea

de dos curvas espectrales, lo que en muchas casos puede ser interesante, aunque en la mayoría de ellos es suficiente con una sola curva espectral aproximada, por lo que no se utilizan en forma sistemática.

2.-- Características de fase. La elección de estos ángulos de fase es una de las características decisivas para el empleo de un método u otro de cálculo. Efectivamente ya se ha apuntado dos posibilidades. La primera estriba en la elección de un conjunto de ángulos correspondientes a una distribución uniforme, y multiplicar luego el proceso estacionario resultante de la antitransformada de Fourier de $A(\omega)$ en $\phi(\omega)$ por la función de modulación elegida.

La segunda posibilidad se refiere a la utilización de un sistema de ángulos de fase con una distribución normal de diferencias de fase, con las características de media y desviación típica adecuada, con lo cual la antitransformada de $A(\omega)$ en $\phi(\omega)$ es ya de por sí no estacionaria y con la forma típica de un registro real.

3.-- Frecuencias. Si bien hemos dicho que el registro, en lo concerniente a la parte estacionaria, se conseguiría como la antitransformada de Fourier de una función, naturalmente, esa integral habrá que realizarla de forma numérica como:

$$\ddot{z}(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (6)$$

la elección de frecuencias ω_k es otro de los puntos importantes del proceso, y fundamentalmente existen dos alternativas.

La primera se refiere a la utilización de frecuencias igualmente espaciadas en la forma $\omega_k = \frac{2\pi k}{T}$ donde T es la duración del registro. Es la forma típica de Fourier y permite la posibilidad de cálculo de la antitransformada mediante el algoritmo FFT, con lo cual la disminución de tiempo de cálculo es ostensible.

Sin embargo, debido a que se realiza un proceso iterativo no sólo hay que intentar disminuir el tiempo de cálculo en cada iteración sino el número de ellas, es por ello por lo que muy a menudo suelen utilizarse frecuencias, que si bien no -- igualmente espaciadas, efectivamente mejoran la aproximación de hecho en cada iteración, reduciéndose el número de éstas. Estas frecuencias se localizan dentro de los puntos de semipotencia correspondientes a la curva de resonancia respecto a la frecuencia anterior.

4.-- Función de modulación. Como último parámetro de la ecuación (1) se encuentra la definición de la función de modulación, cuya forma ya se ha indicado, y que como se ha dicho solo se empleará en el caso de utilizar un conjunto de ángulos de fase distribuidos uniformemente.

PROCEDIMIENTOS DE SIMULACION UTILIZADOS

Se han desarrollado cuatro métodos de aproximación de seismos compatibles con un espectro dado. Estos son:

(1)- Método 1.- El seismo se expresa como:

$$\ddot{z}(t) = \zeta(t) \sum_{k=1}^N A_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t + \phi_k\right) \quad (7)$$

donde ω_k están por tanto igualmente espaciadas, utilizándose por tanto el algoritmo FFT. Del mismo modo ϕ_k es un conjunto de ángulos aleatorios con una distribución uniforme entre 0 y 2π , y $\xi(t)$ es la función envolvente ya indicada.

(2)- Método 2.- La historia en el tiempo se expresa:

$$\ddot{z}(t) = \zeta(t) \sum_{k=1}^N A_k (-1)^k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (8)$$

Es esencialmente igual al anterior salvo que ϕ_k es un sistema de ángulos determinados y ω_k son frecuencias que siguen el método de los puntos de semipotencia, es decir cumplen:

$$\omega_{k+1} < (1+2\xi) \omega_k \quad (9)$$

(3)- Método 3.- El registro de aceleración se expresa:

$$\ddot{z}(t) = \zeta(t) \sum_{k=1}^N A_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (10)$$

que es exactamente igual al anterior salvo que ϕ_k vuelven a ser valores aleatorios distribuidos uniformemente entre 0 y 2π .

(4)- Método 4.- Este método es el que emplean las características de fase de registros reales y se aparta en este sentido algo de los anteriores.

En este caso, la aceleración se expresa:

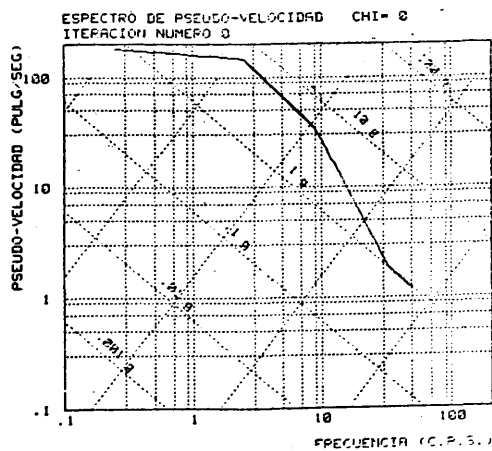
$$\ddot{z}(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t + \phi_k\right) \quad (11)$$

donde ω_k de nuevo vuelven a ser frecuencias -- igualmente espaciadas, y ϕ_k es un sistema de ángulos de fase tal que $\Delta \phi_k$ definida en (5) sigue una distribución normal.

RESULTADOS NUMERICOS

Como ejemplo se ha elegido el diseño de un seismo de corta duración (12 seg.) y aceleración máxima $0,15 g = 4,83$ pies/seg², y como aproximación del espectro para $\xi = 2\%$ mostrado en la Fig. 10, que es el propuesto por la NRC (10).

La función envolvente que se ha escogido para --

Fig. 9. Espectro para $\xi=0$

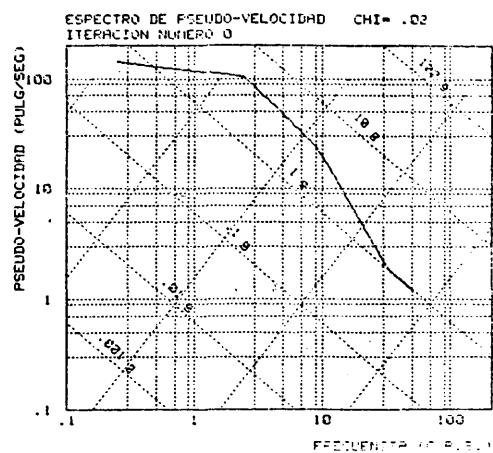
Los tres primeros métodos es la que presenta en la Fig. 9 y viene definida como:

$$\begin{aligned} \zeta(t) &= t^2 & 0 \leq t \leq 2 \\ \zeta(t) &= 1 & 2 \leq t \leq 7 \\ \zeta(t) &= e^{-0.268(t-7)} & 7 \leq t \leq 12 \end{aligned} \quad (12)$$

Los valores de A_k se han aproximado mediante 200 valores del espectro de $\xi=0$, realizándose el escalado a 0,15 g. con lo que para valores de la frecuencia f mayores de $\frac{N}{T} = 16,67$ es presumible la existencia de errores algo mayores en el espectro.

Se realizaron todos los métodos y los resultados se muestran en las Fig. 11 y 18 para cada uno de ellos.

Como criterio de convergencia se escogieron las dos más comunes que son las siguientes:

Fig. 10. Espectro para $\xi=0.02$.

$$\begin{aligned} (1) \quad & \left| \frac{S_i}{S_d} - 1 \right| \leq \epsilon \\ (2) \quad & Er = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \left(\frac{S_i}{S_d} - 1 \right)^2 \right| \leq \epsilon \end{aligned}$$

Así, por ejemplo, para el método 3 se siguió el criterio (2) que es menos restrictivo que el (1) lo que explica que se consiguiera el resultado aptecido de forma rrenos aproximada, si bién en un número menor de iteraciones.

Se observa también en los espectros correspondientes a los métodos 1 y 4 una diferencia más acusada para frecuencias del orden de 20 cps y superiores, lo que ya ha quedado explicado. No así en los métodos 2 y 3, debido a la utilización de las frecuencias de semipotencia que evitan el efecto anteriormente citado producido en el cálculo numérico de la transformada de Fourier. Sin embargo para el método 2 la aproximación no es tan buena, haciendo falta un número mayor de iteraciones para conseguir una aproximación del mismo orden.

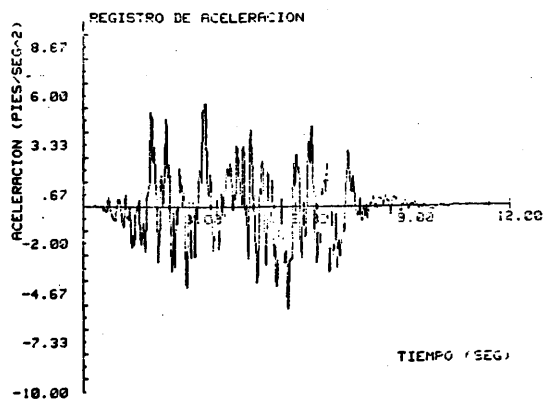


Fig. 11. Registro final.

METODO 1.

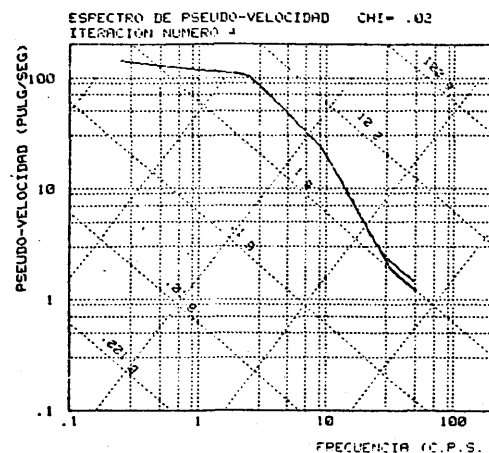


Fig. 12. Espectro final.

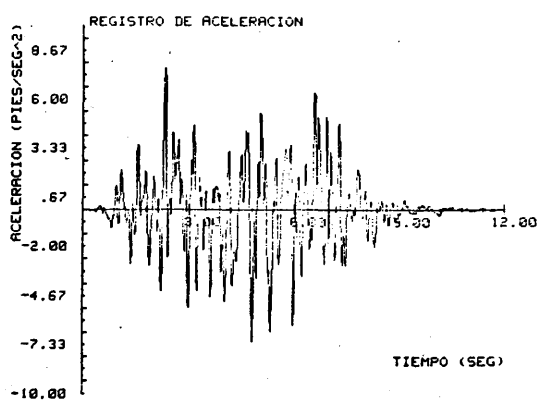


Fig. 13. Registro Final

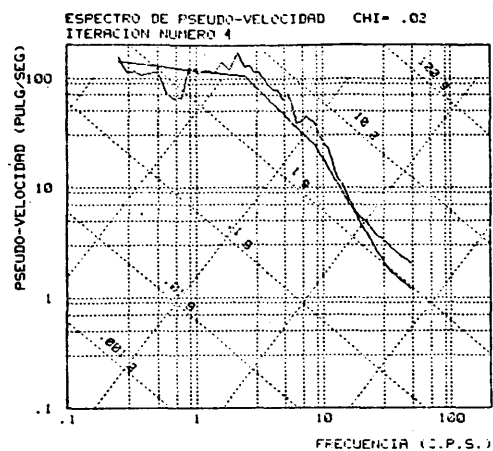


Fig. 14. Espectro final.

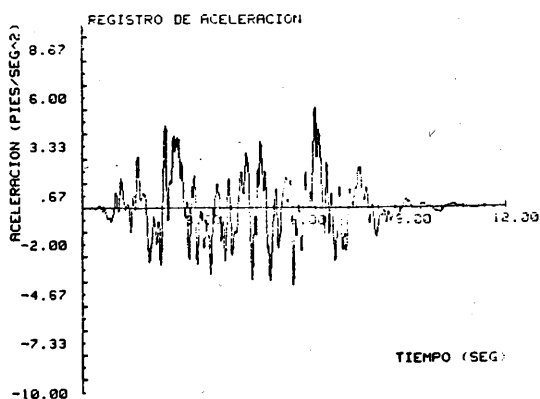
METODO 2.

Fig. 15. Registro Final.

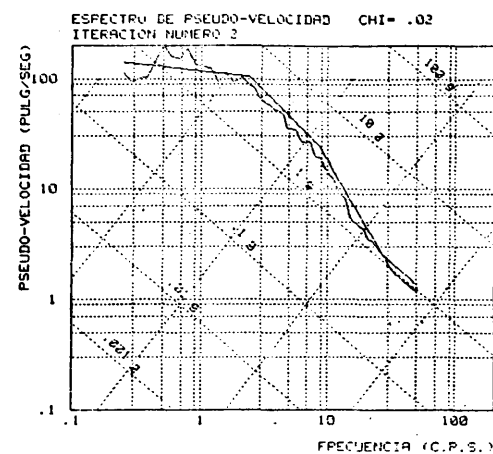


Fig. 16. Espectro final.

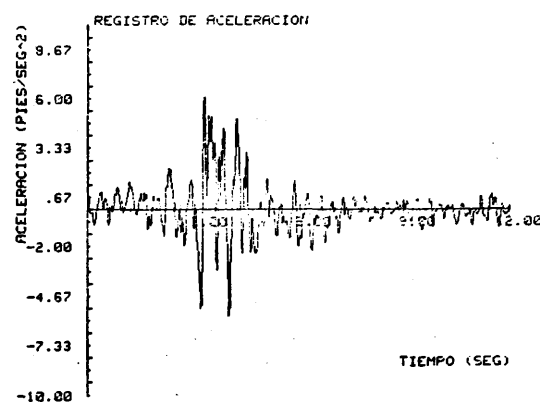
METODO 3.

Fig. 17. Registro Final.

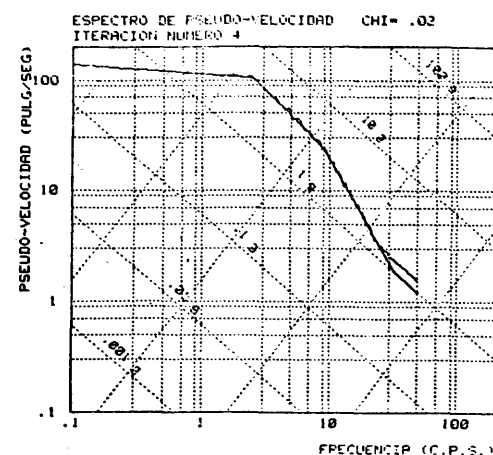


Fig. 18. Espectro final.

METODO 4.

Finalmente en la Fig. 19 se observa el registro inicial para el método 4 para poder observar la variación sufrida a lo largo del proceso iterativo

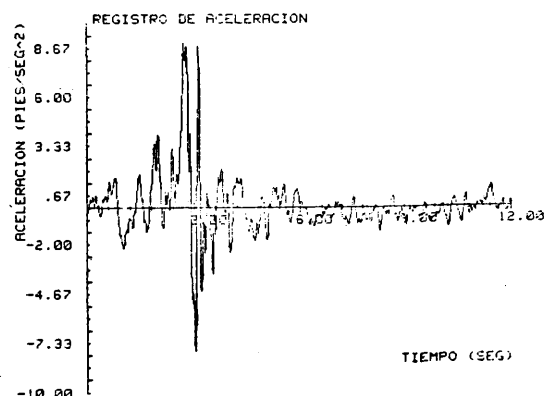


Fig. 19. Método 4. Registro inicial

CONCLUSIONES

Se demuestra pues, la posibilidad de consecución de registro de aceleración compatibles con espectros de diseño.

Se efectúa la comparación entre los distintos métodos actualmente desarrollados, y se propone como método alternativo a los clásicos, que utilizan la función de modulación, el procedimiento del contenido de fase de los registros reales, que es claramente estable, y ofrece una posibilidad más acorde con la realidad.

SUMMARY

The simulation of spectrum-compatible earthquake time histories, has been a need since the beginning of the development of earthquake engineering for complicated structures. More than the safety of the main structure, the analysis of the equipment (piping, racks, etc.) can be assessed only on the basis of time-histories of the floor in which they are contained.

This paper presents several alternatives to the generation of synthetic time histories and the use of the distribution of the differences among the phase-angles is demonstrated to be a useful tool to simulate the nonstationarity of the process. Through the paper an extensive use is made of the F.F.T. algorithm.

REFERENCIAS

Housner, G.W. & Jennings, P.C. ((1964). "Genera-

- tion of Artificial Earthquakes". J. Mech Div. ASCE; 90, 113-150
- Iyengar, R.N. & Rao, F.N. (1979). "Generation of Spectrum Compatible Accelerograms". Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol 7 3, 253-265
- Martín Navarro, A. Simulación de Terremoto y representación Espectral Dyna (1980)
- Newmark, N.M.; Blume J.A.; Kapur, K.K. (1973) "Seismic design spectra for Nuclear -- Power Plants". J. Power Div., ASCE 99, 287-303.
- Ohsaki, Y. (1979). "On the significance of Phase Content in Earthquake Ground Motions -- Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol 7 nº 5, 427-441.
- Regulations Guide, (1973-December). V. S. - Atomic Energy Commission. R.G.160. "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants".
- Ruiz, F. & Penzien, J. (1969) "Artificial Generation of earthquake accelerograms". Report of University of California, Berkeley.
- Saragoni, G.R. & Gary C. Hart (1974). "Simulation of artificial earthquakes-Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol, 2, 249-267.
- Scanlan, H. & Sachs K. (1974) "Earthquake time histories and Response Spectra". J. Mech Div. ASCE, 10, 635-673.
- Seed, B. (1971) "Influence of soil conditions on building damage potential during earthquakes. ASCE (SD) ST 2.
- Shirozuka, M. & Sato, Y. (1967) "Simulation of Nonstationary Random Process". J. Mech Div. ASCE 93, 11-40.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Prof. Dr. Ing., Manuel Díaz del Río y Jáudenes las facilidades otorgadas para el uso del equipo informático del Gabinete de Conservación (R.E.N.F.E.) que él dirige.